

초음파를 이용한 동식물성 혼합 폐유로부터 바이오디젤 제조

정경환[†] · 박병건*

(주)한림연 부설연구소
506-460 광주광역시 광산구 송학동 520-29
*광주여자대학교 식품영양학과
506-713 광주광역시 광산구 산정동 165
(2013년 2월 26일 접수, 2013년 5월 14일 채택)

Biodiesel Production from Waste Oils Mixed with Animal Tallows and Vegetable Oil by Transesterification Using Ultrasonic Irradiation

Kyong-Hwan Chung[†] and Byung-Geon Park*

Hallim Research Institute of Technology, 520-29 Songhak-dong, Gwansan-gu, Gwangju 506-460, Korea

*Department of Food and Nutrition, Kwangju Women's University, 165 Sanjung-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-713, Korea

(Received 26 February 2013; accepted 14 May 2013)

요 약

초음파를 에너지원으로 하는 에스테르 교환 반응에 의해 오리기름과 쇠기름 등 동물성 폐유와 대두유를 혼합한 동식물성 폐유로부터 바이오디젤을 제조하였다. 초음파를 이용한 동식물성 유지의 에스테르 교환 반응 특성과 생성된 바이오디젤의 물리화학적 특성을 조사하였다. 또한, 초음파와 열에너지에 의한 에스테르 교환 반응의 반응특성도 비교하였다. 초음파를 이용한 에스테르 교환 반응에 의한 바이오디젤 수율은 균일계 알칼리 촉매인 수산화칼륨 촉매에서 높았다. 초음파를 이용한 동식물성 혼합 폐유지의 에스테르 교환 반응에서 수산화칼륨 촉매를 식물성 유지에 대해 무게비로 0.5% 사용하고, 혼합 폐유지에 대한 메탄올의 몰 비가 6일 때 지방산 메틸에스테르의 수율이 가장 높았다. 초음파를 에스테르 교환 반응의 에너지원으로 사용하면 반응시간 5분 만에 최고 수율과 평형에 도달하였다.

Abstract – Transesterifications of waste oils mixed with animal tallows and vegetable oil by ultrasonic energy were examined over various catalysts for biodiesel production. Reaction activities of the transesterification were evaluated to the ultrasonic energy and thermal energy. The physicochemical properties of feedstock and products were also investigated to the biodiesels produced from the oils in the reaction using ultrasonic energy. The highest fatty acid methyl ester (FAME) yield was obtained on the potassium hydroxide catalyst in the transesterification by ultrasonic irradiation. The effective reaction conditions by ultrasonic energy were 0.5 wt% catalyst loading and 6:1 molar ratio of methanol to the mixed oils. The reaction rate of the transesterification by ultrasonic energy was faster than that by thermal energy. The highest yields of FAME were obtained as 80% in 5 min and the reaction equilibrium reached at that time.

Key words: Biodiesel, Ultrasonic Irradiation, Animal Tallows, Vegetable Oil, Alkali Catalysts, Transesterification

1. 서 론

바이오디젤은 식물성 유지, 폐식용유, 동물성 지방 등을 화학적으로 전환시켜 생산되는 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl esters: FAME)를 말하며 대체연료로서 크게 관심을 모으고 있다[1-3]. 구조적 특징으로는 무게기준으로 10% 정도의 산소를 함유하며, 황성분과 방향족 탄화수소는 포함하고 있지 않다[4]. 바이오디젤은 경유와 물리화학적 특성이 유사하여 경유용 자동차의 엔진을 변경하지 않고 바로 사용하거나 경유와 혼합하여 사용할 수 있다. 바이오디젤의 물

리적 성질은 석유정제를 통해 생산되는 경유와 매우 유사하지만 생산과정에서 배출하는 대기오염 배출량이 매우 적으며 사용 시 매연이나 미세먼지, 이산화탄소 등 공해물질 배출을 크게 줄일 수 있다.

바이오디젤 제조방법은 열분해, 미세 에멀전화(microemulsification), 희석, 에스테르 교환(transesterification), 그리고 초임계공정[5-9] 등이 있다. 에스테르 교환은 알코올리시스(alcoholysis)라고도 불리며 가수분해와 유사한 과정을 통해 에스테르를 다른 알코올로 치환시키는 공정이다. 이 반응에 메탄올을 사용하면 메탄올리시스(methanolysis)라고 하며 메탄올과 트리글리세라이드의 반응에 의해 바이오디젤로 불리는 지방산 메틸에스테르와 글리세롤이 생성된다.

일반적으로 알려진 바이오디젤제조 방법은 유지와 알코올을 반응시키는 에스테르 교환반응(transesterification)으로, 수산화칼륨 등 알칼

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: chung-sea@hanmail.net

[‡]이 논문은 전남대학교 서곤 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

리 촉매를 사용하거나 산촉매를 사용하여 60~90 °C 부근에서 3~12 시간 동안 반응시켜 제조한다. 생성물로는 바이오디젤 외에 글리세롤이 생성되므로 이를 분리하는 공정과 알콜을 증류하여 분리시키는 공정이 필요하다. 바이오디젤의 순도를 높이기 위해 촉매를 증화시키고 생성물을 세척하는 공정 등 복잡한 후처리 공정이 필요하다. 이와 같이 열화학 반응은 반응시간이 오래 걸리는 반면, 초음파를 에너지원으로 에스테르 교환 반응에 적용할 경우 반응시간이 10분 정도로 크게 단축되고 수율도 높게 얻을 수 있으며 장치도 비교적 간단해지는 장점이 있는 것으로 확인되었다[10,11].

초음파는 공동화 기포(cavitation bubble)를 분사시켜 액체-액체 계면 사이의 상호작용을 증대시킨다. 화학공정에서 초음파는 반응물의 물질전달과 반응성을 향상시켜 반응시간을 단축시키고 촉매 사용량을 감축시키는 기능이 있다[12]. 이러한 초음파의 기능이 에스테르 교환 반응에 의한 바이오디젤 제조 공정에 최근 도입되기 시작하여 팜유[13]와 유채유[14], *Oreochromis niloticus* 오일[15], 소 지방[16] 등 다양한 유지와 촉매계에 적용한 연구 결과가 발표된 적이 있다. 그러나 동식물성 폐유지나 혼합 폐유지에 대해 균일계와 불균일계 촉매를 적용하여 다양한 촉매계에 대해 전반적인 반응 특성을 검토하고, 열에너지에 의한 반응 특성과 비교한 연구 결과는 아직 알려진 바 없다.

우리나라에서 사용되고 있는 바이오디젤 원료물질은 거의 수입에 의존하고 있으며, 2006년까지 바이오디젤 원료물질로 대두유와 폐식용유만 사용되었고 각각 68%와 32%가 공급되었다. 폐식용유에 비해 대두유의 리터당 가격이 30~70원 정도 높게 공급되고 있다. 바이오디젤의 원료로 사용되는 대두유는 100% 수입하고 있으며 폐식용유는 국내에서 회수하여 재활용하고 있다. 대두는 곡물로도 사용이 되고 있어 곡물가격 상승으로 대두유의 가격이 지속적으로 상승하고 있다. 이러한 문제점 때문에 국내 바이오디젤 생산업체 중 일부는 대두유를 대체하기 위한 바이오디젤 원료물질 확보를 위해 노력하고 있으며, 팜유와 자트로파 오일 등이 대안으로 거론되고 있다.

바이오디젤의 생산 가격은 원료 가격이 70~80%를 차지하므로 가격적 저렴한 원료를 채택하면 원료가 차지하는 비중을 낮출 수 있어 가격 경쟁력을 높일 수 있다. 이를 위해서는 앞에서 거론된 원료보다는 폐기되는 동물성 기름이나 식물성 폐유지를 재활용하여 원료로 사용하는 것이 훨씬 경제적이며 환경오염원 감소에도 일조할 수 있다.

이 연구에서는 저주파 초음파를 에너지원으로 사용하는 에스테르 교환 반응에 의해 동·식물성 폐유지와 혼합 폐유지로부터 바이오디젤을 제조하는 공정에 대해 조사하였다. 식물성 유지로 대두유를, 동물성 폐유지로는 오리기름과 쇠기름을 사용하였으며 혼합 동·식물성 폐유지에 대해 균일계와 불균일계 알칼리 촉매를 적용하여 반응 특성을 평가하였다.

2. 실험

2-1. 촉매 및 시약

촉매는 균일계와 불균일계 알칼리 촉매를 적용하였다. 균일계 촉매로는 수산화칼륨(KOH; Aldrich, 98%)과 수산화나트륨(NaOH; Daejung, 98%)을 사용하였으며 불균일계 촉매로는 산화칼슘(CaO; Kanto, 98%)을 사용하였다. 실험에 사용한 촉매는 전처리하지 않고 바로 반응에 사용하였다.

식물성 유지는 시중에서 판매되고 있는 대두유(soybean oil;

Ottogi)와 닭오리 후 폐식용유를 사용하였다. 동물성 폐유지로는 식당에서 요리 후 얻어진 오리기름(duck oil)과 쇠기름(beef tallow)을 모아 잔유물을 걸러낸 후 실험에 사용하였다. 혼합 폐유지는 각각 폐유지를 동일한 중량비로 혼합하여 실험하였다. 식물성 유지와 함께 메탄올(CH_3OH ; Daejung, 98%)을 반응물로 사용하였다.

2-2. 초음파를 이용한 에스테르 교환 반응

반응실험은 Fig. 1에 보인 바와 같은 저주파 초음파 발생기(Sonics & Materials Inc., Vibra Cell)를 적용한 반응시스템에서 이루어졌다. 반응의 에너지원은 초음파 제어기(ultrasonic controller)로 초음파 발생조건이 제어되는 초음파 탐침(ultrasonic probe)에서 발생한 초음파를 적용하였다. 초음파의 발생조건은 400 W, 20 kHz 출력으로 증폭율은 25%로 연속 발생시켜 실험에 적용하였다. 반응기는 반응 중 반응물의 온도 변화를 막기 위하여 항온수조에서 순환되는 열매체에 의해 30 °C를 항상 유지할 수 있도록 설계하였다. 열에 의한 에스테르 교환 반응은 열전대가 설치되고 5 °C로 유지되는 콘덴서가 설치되었으며, 반응물 교환이 가능한 500 mL 3구 플라스크 반응기에서 이루어졌다. 반응기의 온도는 PID 온도조절기로 조절되는 히터에 의해 65 °C로 일정하게 유지되었다.

반응조건에 따른 바이오디젤 제조 수율 변화를 조사하기 위해 식물성 유지 50 g에 대하여 식용유와 메탄올의 몰 비가 1:6~1:20, 촉매량은 0.5~10 g 범위에서 반응시간은 5분~1시간을 유지하며 200 mL 시험관 반응기에서 실험하였다.

2-3. 바이오디젤 특성 분석

생성물의 조성은 모세관 칼럼(HP-1, 50 m × 0.32 mm × 0.17 μm)과 FID 검출기가 장착된 가스크로마토그래프(HP 5890, Hewlett Packard)로 분석하였다. 분석 조건은 검출기와 인젝터의 온도는 290 °C, 컬럼의 온도는 140 °C에서 5 °C/min의 속도로 290 °C까지 승온시킨 후 이 온도에서 20분을 유지시키면서 시료를 분석하였다.

EU에서 정한 EN 14103 시험방법[17]에 의해 메틸에스테르 함량을 가스크로마토그래피법으로 조사하여 바이오디젤 품질 적합성을 시험하였다. EU의 바이오디젤 표준규격(EN 14214) 기준에 의하면 메틸에스테르 함량은 최저 96.5% 이상(BD 100 기준)이다. 생성물은 바이오디젤의 수율과 물리화학적 특성을 조사하기 위해 글리세롤을 분리하고 메탄올은 증류하여 분리하였다.

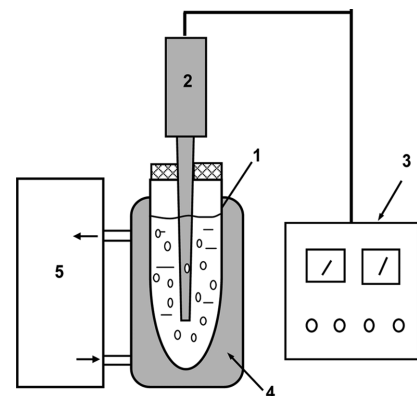


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

1. Ultrasonic reactor
2. Ultrasonic probe
3. Ultrasonic generator
4. Water jacket
5. Water circulator with temperature controller

EN 14103 시험방법에 따라 먼저 메틸헵타데카노에이트(methyl heptadecanoate; C17:0, TCI, 99%)과 헵탄(C₇H₁₆; Daejung, 98%)을 사용하여 10 mg/mL 용액을 표준시료로 제조하였다. 이 표준시료 5 mL에 실험으로부터 얻은 생성물 250 mg을 혼합하여 용해시킨 후 이를 가스크로마토그래프로 분석하였다. 결과 분석은 생성물 중 바이오디젤인 C14:0 부터 C24:1까지 메틸에스테르의 면적값을 구하여 식 (1)에 의해 메틸에스테르의 함량 즉, 바이오디젤의 수율을 계산하였다. 여기서 C14나 C24는 결합된 탄소의 수를, 콜론 다음에 오는 숫자는 이중결합의 수를 나타낸다.

$$Y_{ester}(\%) = \frac{\sum A - A_{STD}}{A_{STD}} \times \frac{C_{STD} V_{STD}}{m} \times 100 \quad (1)$$

위 식에서 $\sum A$ 는 C14:0~C24:1까지 피크의 총 면적을, A_{STD} 는 표준물질인 메틸헵타데카노에이트의 면적을, C_{STD} 는 메틸헵타데카노에이트의 농도(mg/mL)를, V_{STD} 는 사용된 메틸헵타데카노에이트의 부피(mL)를 나타내며, m 은 측정용 시료의 양(mg)을 나타낸다.

반응 원료인 폐식용유와 생성물인 바이오디젤의 산가는 EN ISO 661(Animal and vegetable fats and oils-Preparation of test sample)의 분석 방법[17]을 따라 측정하였다. 산가는 식 (2)으로부터 계산된다.

$$N_{acid} = \frac{56.11 \times V \times C}{m} \quad (2)$$

여기서 V 는 적정에 사용한 KOH 용액의 부피(mL)를, C 는 KOH 용액의 농도(mol/L), m 은 시료의 질량(g)을 나타낸다.

동점도는 ASTM D 445 시험방법[18]에 따라 Cannon-Fenske형 모세관 점도계를 사용하여 측정하였다. 반응물과 생성물의 점도는 하이드로미터(hydrometer)를 사용하여 비중(ρ_{spec})을 측정한 후 표준 밀도(ρ_{ref})와의 관계식($\rho = \rho_{ref} \times \rho_{spec}$)으로부터 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 동식물성 폐유로부터 바이오디젤 제조

Fig. 2는 초음파를 에너지원으로 하는 에스테르 교환 반응에 의한

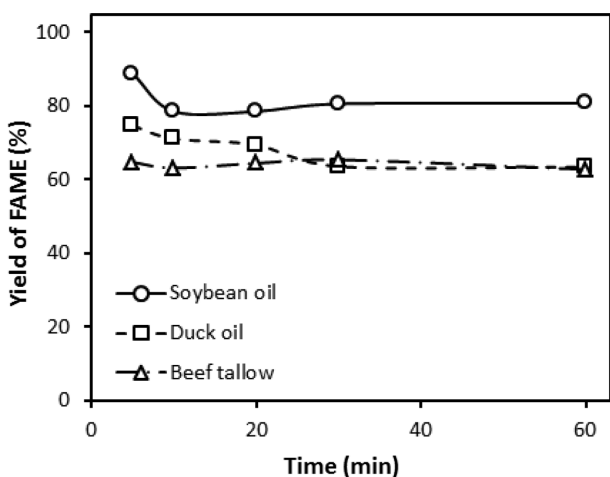


Fig. 2. Yield of FAME with reaction time by transesterification using ultrasonic irradiation from various waste oils on KOH catalyst. Reaction conditions: MeOH/oil molar ratio=6, loading amount of KOH catalyst=0.5 wt%.

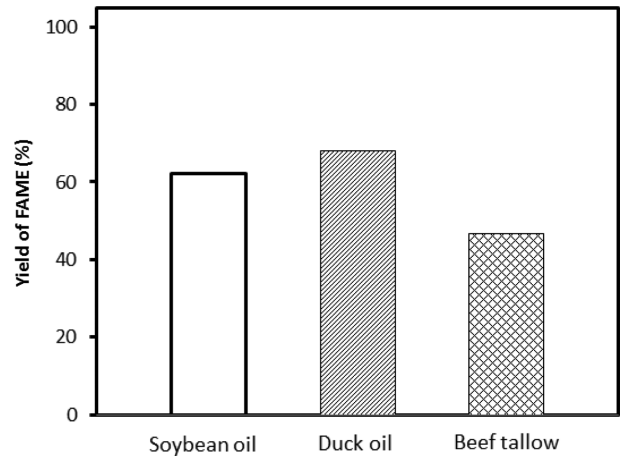


Fig. 3. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from various waste oils on NaOH catalyst. Reaction time=5 min, MeOH/oil molar ratio=6.

바이오디젤 제조 공정에서 KOH 촉매에 대한 동식물유의 바이오디젤 생성 수율을 보인 것이다. 반응 결과 동식물성 폐유지를 원료로 사용하여 65% 이상 바이오디젤 생성 수율이 얻어졌다. 대두유를 원료로 사용하면 수율이 85%를 넘기도 하였다. 초음파를 에너지원으로 사용한 반응결과 반응시간이 5분 정도 경과하면 최고 수율에도 도달하였고 시간이 경과함에 따라 도리어 수율이 조금씩 감소하는 현상을 보였다.

열화학 반응에 의한 바이오디젤 제조의 경우 반응시간이 60분 이상 경과하여야 최고 수율에 도달하는 결과를 보인다[19]. 그러나 초음파를 에너지원으로 사용하면 반응시간이 크게 단축되는 것을 알 수 있었다. 초음파 에너지를 사용하여 여러 가지 식물유를 원료로 사용하여 바이오디젤을 제조하는 에스테르 교환반응에서도 비슷한 결과를 보인 바[10] 있어 결과의 재현성을 확인할 수 있었다. 그리고 동물성 폐유지인 오리기름과 쇠기름을 원료로 사용한 경우에서도 이른 반응시간에 최고 바이오디젤 생성 수율을 보였다.

Fig. 3에는 초음파를 에너지원으로 사용하고 NaOH를 촉매로 사용하였을 때 폐 동식물유의 바이오디젤 생성 수율을 보인 것이다. 반응시간은 5분으로 정하고 메탄올과 폐동식물유 원료의 비는 몰비로

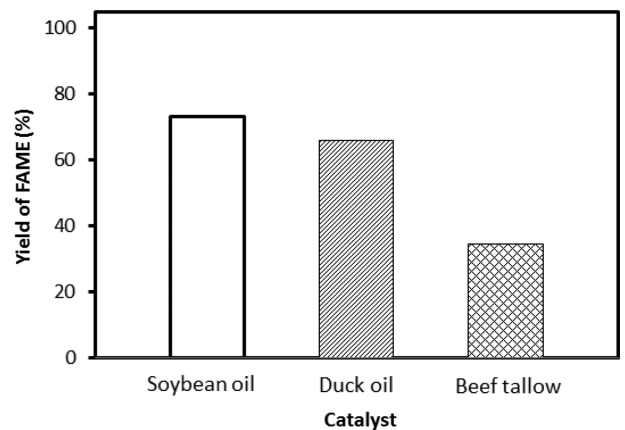


Fig. 4. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from various waste oils on CaO catalyst. Reaction time=5 min, MeOH/oil molar ratio=6.

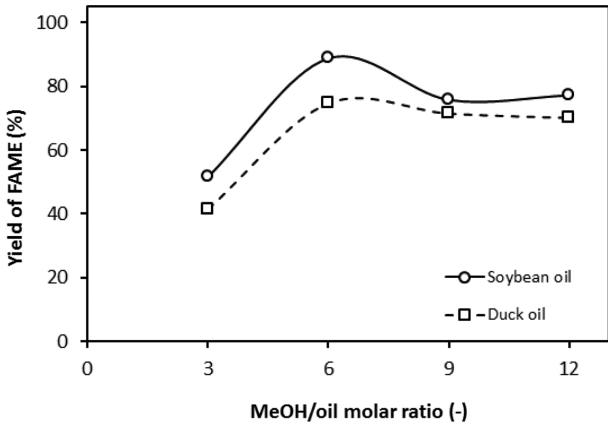


Fig. 5. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from various waste oils with different MeOH/oil molar ratios on KOH catalyst.

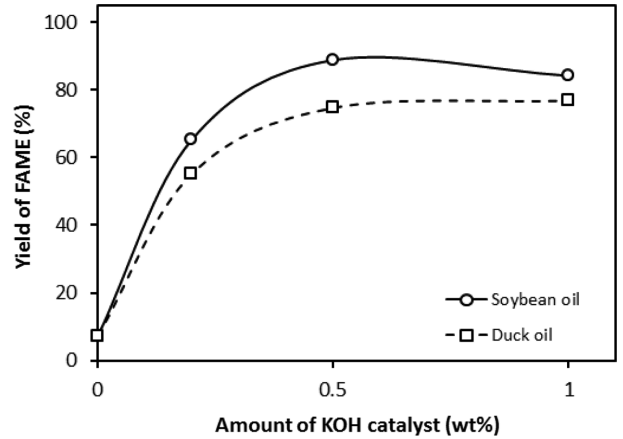


Fig. 6. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from various waste oils with different injection amount of KOH catalyst.

6:1로 조절하였다. NaOH 촉매에서 생성 수율은 오리기름을 원료로 사용한 경우 가장 높았으며 쇠기름에서는 50% 정도 수율을 보였다. 전체적으로 KOH를 촉매로 사용한 경우 보다 바이오디젤 생성 수율이 낮았다.

고체 알칼리 촉매인 CaO를 반응의 촉매로 사용하여 위와 동일한 조건의 실험을 행한 결과에서 바이오디젤의 수율을 Fig. 4에 보였다. 대두유를 원료로 사용한 반응에서는 70% 이상 수율을 보였으며 오리기름도 비교적 높은 수율을 보였다. 그러나 쇠기름에 대해서는 40% 보다 낮은 수율을 나타내었다. 이는 원료인 폐 쇠기름이 다른 원료 기름보다 단백질 등 잔유물이 많고 점도도 높아 초음파에 의한 공동화 효과가 적게 나타나 반응 수율도 낮은 것으로 판단된다. CaO 촉매에 의한 바이오디젤 제조 실험 결과 KOH 촉매에 의한 결과 보다 바이오디젤 생성 수율은 약간 낮았다. 그러나 CaO 촉매는 원료에 대해 불균일 촉매이므로 생성물이나 반응물로부터 촉매를 분리하기가 용이하고 촉매의 재생 가능성이 있어 효용 가치가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5에는 초음파를 에너지원으로 사용하는 폐 동식물유로부터 바이오디젤 제조 공정에 대한 최적 반응 조건을 조사하기 위하여 반응물인 메탄올과 원료의 몰 비를 달리하였을 때 바이오디젤 제조 수율을 보였다. 반응물 중 메탄올의 양은 원료 유지에 비해 몰 비로 6 배 정도 혼합한 경우 가장 높은 생성 수율을 보였다. 반응시간은 5분이었다. 화학양론비에 따르면 이론적 메탄올/유지의 비는 3이나 보통 유지에 대해 메탄올을 과잉으로 공급하여 반응시킨다. 그림에서 볼 수 있듯이 메탄올과 유지의 비가 6일 때 반응 수율이 가장 높았다. 메탄올의 양이 더 늘어나면 반응 수율이 약간씩 낮아지는 경향을 보였다. 전환율은 메탄올의 함량이 많아질수록 평형이 생성물 쪽으로 유리하고, 유지와 생성된 글리세린의 용해도가 높아져 반응 진행에 유리하다. 그러나 메탄올의 함량이 너무 많아지면 유지의 활동도가 상대적으로 낮아지므로 전환율이 지속적으로 증가하지는 않는 것으로 판단된다.

메탄올과 원료 유지의 비는 6으로 정한 다음 KOH 촉매의 주입량에 따른 반응 결과를 Fig. 6에 나타내었다. KOH 촉매의 양을 원료에 대해 0.5 wt%를 주입하였을 때 가장 높은 생성 수율을 보였으며 촉매의 양을 늘리면 대두유의 경우 도리어 약간 감소하는 경향을 보였다. 촉매 사용량이 많아지면 반응 수율이 증가하나 촉매 사용량이 지나치

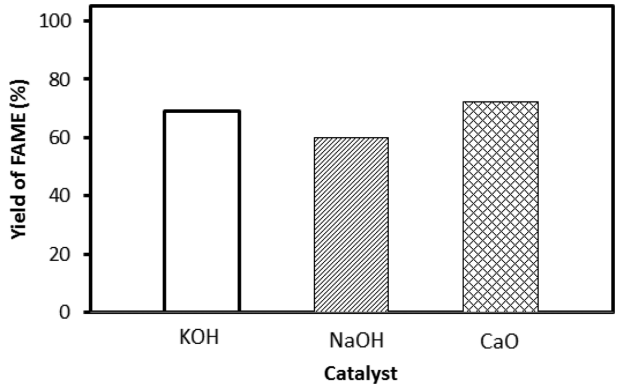


Fig. 7. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from mixed oil of soybean oil and duck oil on various catalysts. Reaction time=5 min.

게 많아지면 증가 정도가 완만해지고, 아주 많아지면 반응 수율이 도리어 낮아진다. 수산화칼륨 촉매의 사용량이 지나치게 많아지면 비누화 반응으로 진행되면서 반응 수율이 낮아지게 된다. 고체 촉매 표면에서 반응 속도가 결정되면 촉매 사용량에 따라 반응 전환율이 증가한다. 그러나 촉매 사용량이 지나치게 많아지면 생성물이 촉매의

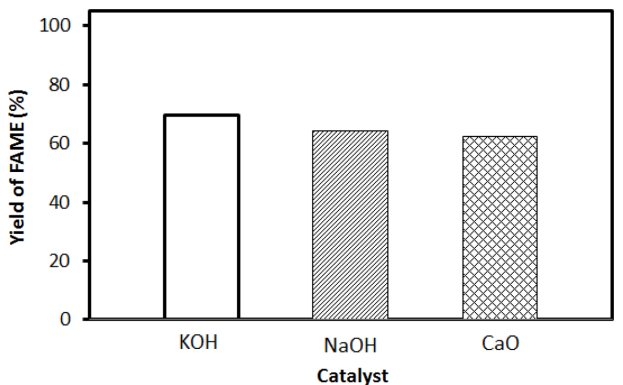


Fig. 8. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from mixed oil of soybean oil and beef tallow on various catalysts. Reaction time=5 min.

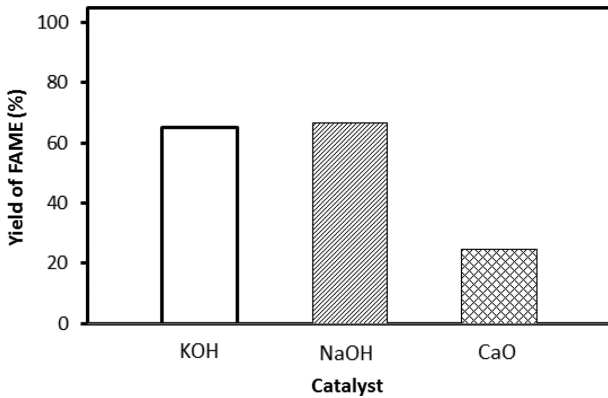


Fig. 9. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from mixed oil of duck oil and beef tallow on various catalysts. Reaction time=5 min.

표면에 흡착되어 반응 수율이 낮아진다.

3-2. 동식물 혼합 폐유로부터 바이오디젤 제조

대두유와 오리기를 혼합유 원료의 초음파 에너지에 대한 바이오디젤 생성 결과를 Fig. 7에 보였다. 원료의 혼합비는 중량비로 1:1로 조절하였으며 KOH, NaOH, CaO 촉매에 대해 조사하였다. 실험 결과 CaO 촉매에서 가장 높은 수율을 보였으며 KOH 촉매에도 70% 가량 수율을 나타내었다.

대두유와 쇠기름을 동일한 양으로 혼합한 동식물성 혼합유에 대한 각 촉매의 바이오디젤 수율을 Fig. 8에 보였다. KOH 촉매에서 70% 가량 가장 높은 수율을 나타내었으며 다른 촉매에서도 60% 이상 바이오디젤 수율을 보였다 전체적으로는 대두유와 오리기를 혼합유 보다는 약간 낮은 수율을 보였다.

동식물성 폐유인 오리기름과 쇠기름 혼합유에 대한 바이오디젤 제조 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. KOH와 NaOH 촉매에서는 60% 이상 수율을 보였으나 CaO 촉매에서는 수율이 매우 낮았다. 이는 혼합유의 점성이 매우 높아 고체 촉매인 CaO와 반응에 필요한 정상적인 유향 현상을 보이지 못한 이유 때문으로 판단되었다.

동일한 질량비로 대두유와 오리기름 그리고 쇠기름을 혼합한 동식물성 혼합 폐유에 대한 바이오디젤 제조 실험 결과를 Fig. 10에 보였다. KOH 촉매에서 수율이 약 75%로 나타났으며 다른 촉매에

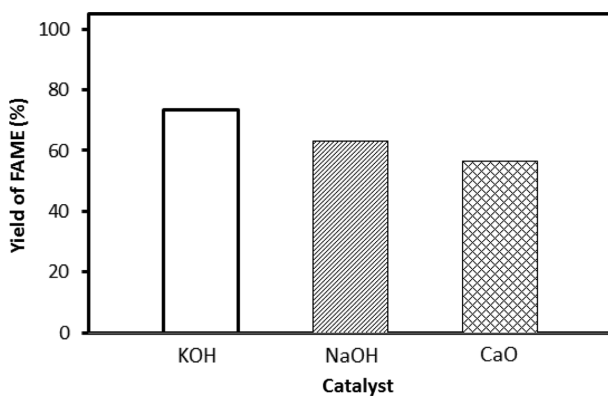


Fig. 10. Yield of FAME produced by transesterification using ultrasonic irradiation from mixed oil of soybean oil, duck oil and beef tallow on various catalysts. Reaction time=5 min.

Table 1. Physicochemical properties of various feedstocks and their products after transesterification using ultrasonic irradiation

	Oils	Density (g/cm ³)	Dynamic density (mm ² /s)	Acid value (mg KOH/g)
Feedstock	Soybean oil (SO)	0.89	23.7	0.39
	Duck oil (DO)	0.91	25.9	0.94
	Beef tallow (BT)	0.94	27.1	0.39
	Mixed oil (SO+DO+BT)	0.91	24.3	0.65
Product	Soybean oil (SO)	0.87	3.21	0.21
	Duck oil (DO)	0.88	3.57	0.45
	Beef tallow (BT)	0.88	3.04	0.23
	Mixed oil (SO+DO+BT)	0.87	3.07	0.25

서도 60% 이상 바이오디젤 생성 수율을 보였다.

Table 1에 반응 전 폐유지의 점도, 동점도, 산가를 조사한 값과 반응 실험 후 얻은 생성물에 대한 물성값을 평가하여 정리하였다. 반응 전 동식물성 폐유지는 점도가 높고 산가도 높았으나 반응 후 생성물의 점도와 산가 등 물성값은 낮아지면서 석유품질 기준에 정한 바이오디젤 규격의 범위에 부합하는 결과를 보였다. 특히 동점도는 1/8 정도로 낮아지며 품질이 향상되는 결과를 보였다.

4. 결 론

초음파를 에너지원으로 하는 에스테르 교환 반응에 의해 동식물성 폐유지와 혼합 폐유지로부터 바이오디젤을 제조하였다. 초음파를 이용한 식물성 유지의 에스테르 교환 반응에서 수산화칼륨 촉매를 식물성 유지에 대해 무게비로 0.5 wt% 사용하고, 유지에 대한 메탄올의 몰 비가 6일 때 지방산 메틸에스테르의 수율이 가장 높았다. 초음파를 이용한 동식물성 폐유지로부터 바이오디젤 제조 수율은 균일 계 촉매인 수산화칼륨 촉매에서 가장 높은 수율을 보였으며 불균일 계 알칼리 촉매인 산화칼슘 촉매에서도 의미 있는 결과를 보였다. 초음파를 에스테르 교환 반응의 에너지원으로 사용하면 5분 정도에 최고 수율에 도달할 정도로 반응속도가 빨라 공정 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- Marchetti, J. M., Miguel, V. U. and Errazu, A. F., "Possible Methods for Biodiesel Production", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **11**, 1300-1311(2007).
- Lee, J.-S. and Park, S.-C., "Recent Developments and Challenging Issues of Solid Catalysts for Biodiesel Production", *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **48**, 10-15(2010).
- Lee, S. U., Gwon, K. J., Seo, C., Hong, Y. K., Hong, W. H. and Chang, H. N., "Bioprocessing Aspects of Fuels and Chemicals from Biomass", *Korean J. Chem. Eng.*, **29**, 831-850(2012).
- Jung, C.-S. and Dong, J.-I., "Oxidation Characteristics of Biodiesel and Its Blend Fuel", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**, 284-290(2007).
- Yu, M. J., Jo, Y.-B., Kim, S.-G., Lim, Y.-K., Jeon, J.-K., Park, S. H., Kim, S.-S. and Park Y.-K., "Synthesis of Biodiesel from an Oil Fraction Separated from Food Waste Leachate", *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 2287-2292(2011).
- Saka, S. and Dadan, K., "Biodiesel Fuel from Rapeseed Oil as Prepared in Supercritical Methanol", *Fuel*, **80**, 225-231(2001).

7. Kusdiana, D. and Saka, S., "Kinetics of Transesterification in Rapeseed Oil to Biodiesel Fuel as Treated in Supercritical Methanol," *Fuel*, **80**, 693-698(2001).
8. Kusdiana, D. and Saka, S., "Effects of Water on Biodiesel Fuel Production by Supercritical Methanol Treatment," *Bioresour. Technol.*, **91**, 289-295(2004).
9. Min, E.-J. and Lee, E.-S., "Energy Consumption of Biodiesel Production Process by Supercritical and Immobilized Lipase Method," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **50**, 257-263(2012).
10. Chung, K.-H. and Park, B.-G., "Biodiesel Production from Vegetable Oils by Transesterification Using Ultrasonic Irradiation," *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 385-390(2010).
11. Cho, H.-J., Lee, S.-B. and Lee, J.-D., "Production of Lard Based Biodiesel Using Ultrasound Assisted Transesterification," *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 155-160(2011).
12. Thanh, L. T., Okitsu, K., Sadanaga, Y., Takenaka, N., Maeda, Y. and Bandow, H., "Ultrasound-assisted Production of Biodiesel Fuel from Vegetable Oils in a Small Scale Circulation Process," *Bioresour. Technol.*, **101**, 639-645(2010).
13. Stavarache, C., Vinatoru, M., Maeda, Y. and Bandow, H., "Ultrasonically Driven Continuous Process for Vegetable Oil Transesterification," *Ultrason. Sonochem.*, **14**, 413-417(2006).
14. Georgogianni, K. G., Katsoulidis, A. K., Pomonis, P. J., Manos, G. and Kontonminas, M. G., "Transesterification of Rapeseed Oil for the Production of Biodiesel Using Homogeneous and Heterogeneous Catalysis," *Fuel Process. Technol.*, **90**, 1016-1022(2009).
15. Santos, F. F. P., Malverira, J. Q., Cruz, M. G. A. and Fernandes, F. A. N., "Production of Biodiesel by Ultrasound Assisted Esterification of Oreochromis Niloticus Oil," *Fuel*, **89**, 275-279(2010).
16. Teixeira, L. S. G., Assis, J. C. R., Mendonca, D. R., Santos, I. T. V., Guimaraes, P. R. B., Pontes, L. A. M. and Teixeira, J. S. R., "Comparison Between Conventional and Ultrasonic Preparation of Beef Tallow Biodiesel," *Fuel Process. Technol.*, **90**, 1164-1166(2009).
17. van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D. and Knothe, G., *Biodiesel Analytical Methods*, NREL/SR-510-36240(2004).
18. <http://www.astm.org/Standard/index.shtml>.
19. Chung, K.-H., Kim, J. and Lee, K.-Y., "Biodiesel Production by Transesterification of Duck Tallow with Methanol on Alkali Catalyst," *Biomass Bioenergy*, **33**, 155-158(2009).